

Impressum

Herausgeber:
© Robert Bosch GmbH, 1989
Postfach 301220,
D-70442 Stuttgart,
Unternehmensbereich
Kraftfahrzeugausrüstung,
Abteilung KF/PD12
Produktmarketing Dienste,
Technische Publikationen.
Chefredakteur:
Dipl.-Ing. (FH) Horst Bauer.

Redaktion:
Dipl.-Ing. Karl-Heinz Dietzche,
Dipl.-Ing. (BA) Jürgen Czepl,
Dipl.-Holzw. Hubert Dörner.

Technische Grafik:
Bauer & Partner GmbH, Stuttgart.

Redaktionssekreter: Dr. H. 1989

Alle Rechte vorbehalten.

Printed in Germany.

Imprimatur: Alle Rechte vorbehalten.
22., aktualisierte und erweiterte Auflage,
Friedr. Vieweg & Sohn
Verlags-Gesellschaft mbH,
Braunschweig/Wiesbaden, 1989.
Voranfrage erschienen im
Springer-Verlag, Berlin/Helldorf.

ISBN 3-528-03876-4

YN2

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme
Kraftfahrtechnisches Taschenbuch / Bosch.
Herausg.: Horst Bauer. - 22., aktualisierte und erw. Aufl. -
Braunschweig : Wiesbaden : Vieweg, 1989
ISBN 3-528-03876-4

Nachdruck, Vervielfältigung und Über-
setzung, auch auszugsweise, nur mit
unserer vorherigen schriftlichen Zustin-
mung und mit Qualifikationsnachweis.
Abbildungen, Beschriftungen, Schema-
zeichnungen und andere Angaben die-
nen nur der Erläuterung und Darstellung
des Textes. Sie können nicht als Grund-
lage für Konstruktion, Einbau und Liefe-
rung verwendet werden. Wir überneh-
men keine Haftung für die Übernahme-
mung des Inhalts mit den jeweils gel-
tenden gesetzlichen Vorschriften.
Änderungen vorbehalten.

Die im Inhalt genannten Markenbezeich-
nungen dienen als Beispiele und stellen
keine Bewertung oder Bevorzugung
eines Herstellers dar. Markenzeichen
sind nicht als solche gekennzeichnet.
Bilder- und Informationsmaterial stellen
keine Gewähr zur Verfügung.
Audi AG, Ingolstadt,
Bayerische Motoren Werke AG,
München,
Behr GmbH & Co., Stuttgart,
Bosch Fahrzeugteile GmbH & Co. KG,
Coblenz,
Continental AG, Hannover,
DaimlerChrysler AG, Stuttgart,
Eberspächer KG, Esslingen,
Fichtelberg, Mannheim,
Ludwigshafen,
SK-Waer Turbosystems GmbH,
Frankfurt,
Mannesmann Kierulff GmbH,
Villingen-Schwenningen,
Pierburg GmbH, Neuss,
RWE Energie AG, Essen,
Volkswagen AG, Wolfsburg,
Zahnradfabrik Friedrichshafen AG,
Friedrichshafen,
Quelle: Kraftfahrzeugausrüstung,
Automobil Revue Katalog 1989.

Vorwort zur 23. Auflage

Das „Kraftfahrtechnische Taschenbuch“
ein zuverlässiger Ratgeber mit aktuellen,
knapp gefassten Beiträgen, ist in über
sechzig Jahren ein fester Bestandteil der
Bibliographie der Kraftfahrtechniker.
Seit 1923 hat es weltweit eine Auflage
von über einer Million Exemplaren in
mehreren Sprachen erreicht.

Die 23. Auflage ist, wie frühere Auf-
lagen, auf zwei tragenden Säulen: dem
Wissen der Fachleute aus unserem Haus
und aus der Kraftfahrzeugausrüstung. Sie
haben den Inhalt dieses Taschenbuches
vollständig überarbeitet und auf den aktu-
ellen Stand gebracht. Allen Beteiligten sei
an dieser Stelle für ihre Mitarbeit gedankt.
Das Taschenbuch soll in erster Linie dem
Kraftfahrzeugingenieur und -techniker,
aber auch allen anderen technisch inter-
essierten eine Auskunft über wichtige
Werte und einen Einblick in den gegen-
wärtigen Stand der Kraftfahrtechnische
Dienste ist der Kraftfahrtechnische
Inhalt auf Personen- und Kfz-Technik
und der übrige Stoff auf den praktisch
notwendigen Umfang beschränkt.

Ein umfangreiche Darstellung einzelner
Themen ist im Rahmen dieses Ta-
schenbuches nicht möglich. Allgemeine
technische Themen und Daten sollen im
Hilfsbuch auf den beiden Beilagen
aber nach wie vor aufgeführt. Wir haben
jetzt jedoch auf die „Umrechnungstabe-
len für Einheiten“ verzichtet, da Taschen-
rechner zur allgemeinen Ausstattung
gehören und jeder benötigte Wert anhand
des im Taschenbuch enthaltenen Um-
rechnungsschema einfach zu ermitteln
ist. Auch das Kapitel „Straßenverkehrs-
recht“ (Deutschland) ist wegen der inter-
nationalen Verbreitung des Buches ent-
fallen.

Damit haben wir Platz für neue und
aktualisierte Themen geschaffen, die sich
in einem erweiterten Umfang von 70 zu-
sätzlichen Seiten niederschlagen.
Für einen ersten Überblick empfehlen wir
Innen, das Kraftfahrtechnische Taschen-
buch* vor dem Gebrauch durchzubla-
tern.

Die Redaktion

Zur Orientierung

Gegenüber der 22. Auflage haben wir
aktualisiert bzw. erweitert:
Schwingungen • Akustik • Elektron
Infrarot-Schaltungen, Mikroelektronik
Mechatronik, Sensoren • Statik • Zu-
verlässigkeit • Regelungstechnik
Technik • Störkräfte (Grundlagen, Werk-
stoffe, Schmierstoffe, Kraftstoffe, Be-
triebssstoffe) • Korrosion • Maße •
Ermüdung des Kraftstoffverbrauches •
Dynamik der Kraftfahrzeuge.

Verbrennungsmotoren (Benzindirekt
spitzung, Dieselmotoren, Dieselmotoren
• Koffnung des Motors (Koffnungstechnik)
Thermomanagement, Abgasreinigung,
Aufbauelemente (mehrfache Aufladung,
Motorensteuerung bei Ottomotoren (G)
mischtötung, Benzindirektspitzung,
Einstritzventile, Zündkerzen, ME-Mot
nk, Abgase) • Motorsteuerung bei Di
selmotoren (Abgas-Regelung, Abgas-
Düsen, Abgase, Startflüssigkeit).

Elektrische Antriebe • Lichtstrom (G)
Vielte, ASR für PKW und Nkw) • Lenkun
• Bremssysteme (ABS für PKW, ABS in
ESR für Nkw) • Fahrzeugaufbau Nkw
Lichttechnik (Stufelreflektoren, St-Lin
nen, Leuchten, Lampen).
Autonadio • Einparksysteme • Navigat
onssysteme • Kfz-Infomaxsysteme
Mechanik • Sicherheitsysteme (Aufbau
erkennung, Innenraumüberwachung) • Fah
zeughydraulik (elektrisches Proportions
ventil).
Schaltzeichen • Bordnetz (Batterien, Ba
nrieliefer, wassergekühlter Drehstrom
generator, EHV).

Kraftfahrzeugdaten.

neue Themen aufgenommen:
Kraftschiller • MED-Motoren • Ecopa
betrieb (Motoren) • Brennstoffzellen
E-HB für PKW • Fahrschneidregler
lung (ACC) • Instrumentierung • Va
kehrstelematik • Autonadio (DAB) • Stec
verbindungen • CARTRONIC.

Themen geblieben:
Umrechnungstabellen für Einheiten
Straßenverkehrsrecht (Deutschland).

Regelungssystem des ESP

Regelung

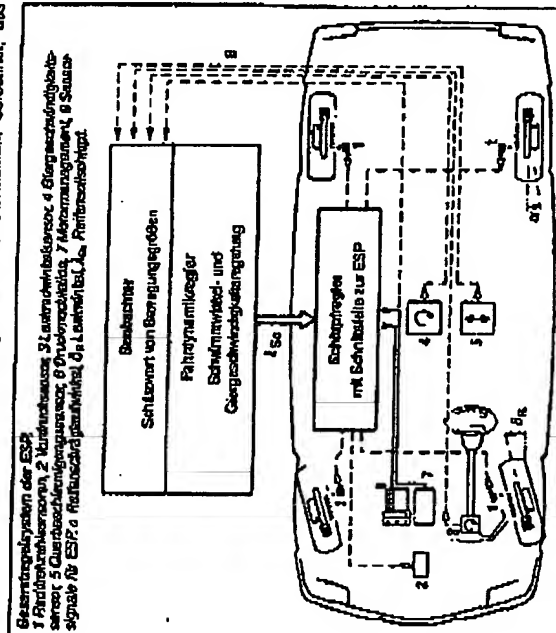
Die Regelung des Fahrzeugverhaltens im fahrdynamischen Grenzgebiet soll die drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs in der Ebene (Längs-, Quer- und Giergeschwindigkeit) und die Hochachse im Sinne eines an den Fahrerwunsch und die Fahrdynamik angepassten Fahrzeugverhaltens beeinflussen. Hierzu ist, wie in Blockschaltbild dargestellt, zuerst festzulegen, welches, wie sich das Fahrzeug im Grenzgebiet entsprechend dem Fahrerwunsch verhalten soll (Solverhalten) und wie es sich tatsächlich verhält (Istverhalten). Zur Vermeidung der Differenz zwischen Soll- und Istverhalten (Regelabweichung) müssen die Regelgrößen in geeigneter Weise über Stellglieder beeinflusst werden.

Das Gesamtsystem EHM (Gesamtregelgerät) erhält das Fahrzeug als Regelstrecke, die Sensoren (1...5) zur Bestimmung der Regelgrößen liefern, die Stellglieder (6 und 7) zur Beeinflussung

der Brems- und Antriebskräfte sowie den hierarchisch strukturierten Regler, bestehend aus überlagerten Fahrdynamikregler und unterlagerten Schließkreisen. Der überlagerte Regler gibt Sollwerte für den unterlagerten Regler in Form von Sollschlupf vor. Im Bedarfsfall wird die geringste Zustandsgröße (Schwimmwinkel β) ermittelt.

Zur Bestimmung des Sollverhaltens werden die den Fahrerwunsch beschreibenden Signale des Lenkdrucksensors (3, Lenkwinkel), des Verdrehmomtsensors (2, Verdrehmoment) und des Motormanagements (7, Antriebsmomentenwunsch) ausgewertet. Zusätzlich gehen in die Berechnung des Sollverhaltens die Halbleitungszahlen und die Fahrzeuggeschwindigkeit ein, die aus den Signalen der Radhubzeitgeber (1), des Querschleunigungssensors (5), der Giergeschwindigkeitssensoren (4) und des Vordrucksensors (2) geschätzt werden. In Abhängigkeit von der Regelabweichung wird das Gliekmoment berechnet, das

Bestandteile des ESP
1 Radhubzeitgeber, 2 Verdrehmoment, 3 Lenkwinkel, 4 Giergeschwindigkeitssensor, 5 Querschleunigungssensor, 6 Druckventil, 7 Motormanagement, 8 Sensor, 9 ESP-ECU, 10 Halbleitungszahlen, 11 Lenkwinkel, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000.



bandigt wird, um die Istzustandsgrößen den Sollzustandsgrößen anzugleichen.

Zur Erzeugung dieser Gliedmomente werden im Fahrdynamikregler die erforderten Sollschlupfwerte an den geeigneten Rädern ermittelt. Sie werden über die unterlagerten Brems- und Antriebsregler und die Stellglieder „Bremsenhydraulik“ (6) und „Motormanagement“ (7) eingestellt.

Das System baut auf bestehenden ABS- und ASR-Komponenten auf. Das ASR-System (8), welches an anderer Stelle beschrieben ist, erlaubt eine aktive Bremsung aller Räder mit hoher Dynamik in gesamten auftretenden Temperaturbereichen.

Durch das Motormanagement (7) mit CAN-Schnittstelle können das erforderliche Kleinformant und damit die Antriebsleistungsquivalente an den Rädern eingestellt werden.

Systemkomponenten

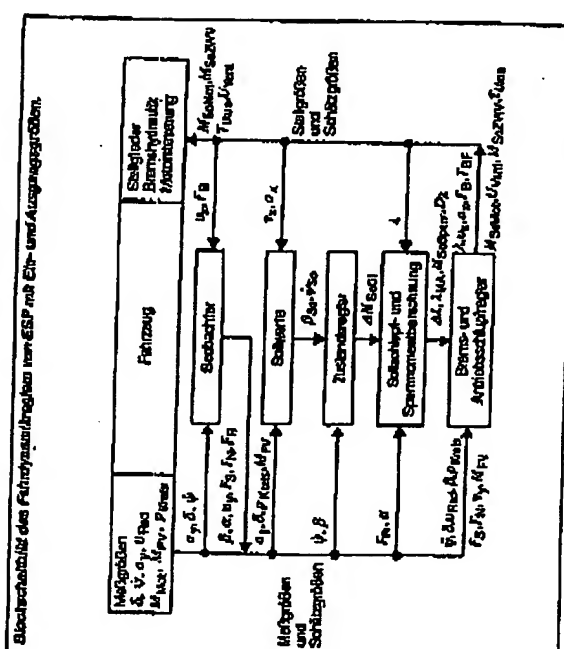
Fahrdynamikregler über bei stationärer Kreisfahrt (S. 355) bestehendes Zusammenhalt zwischen Lenkwinkel, Fahrzeuggeschwindigkeit und Giergeschwindigkeit (S. 356) die Grundlage für die Fahrzeugbewegung sowohl bei stationärer Fahrt als auch beim Bremsen und Beschleunigen. Aus der Fahrzeuggeschwindigkeit und dem Lenkwinkel wird die Giergeschwindigkeit mit Hilfe des „Einspur-Fahrzeugmodells“ berechnet:

$$\dot{\psi}_{\text{so}} = \frac{v_y - \dot{\psi}_{\text{so}}}{(a + c)} \left(1 + \frac{a \cdot c}{v_{\text{so}}^2} \right)$$

Zur Schwimmwinkelregelung wird dieser Wert zuerst entsprechend der Halbleitungszahl der Fahrdynamikregelung begrenzt:

$$|\dot{\psi}_{\text{so}}| \leq \dot{\psi}_{\text{lim}} \cdot g/\dot{\psi}_{\text{lim}}$$

Blockschaltbild des Fahrdynamikreglers vom ESP mit Ein- und Ausgangsgrößen.



wobei die Fallbeschleunigung g und die Hubweggröße Δy und die Fahrzeuggeschwindigkeit v geschätzt werden.

Auf eine direkte Beeinflussung der Quergeschwindigkeit und damit auch des Schwimmwinkels über Lenktraktionen wird verzichtet. Besser läßt sich die Querbewegung indirekt über Schräglauwinkeländerungen einleiten, indem die Drehung des Fahrzeugs durch Erzeugen von Giermomenten eingeleitet wird.

Die Struktur des Fahrmanipulators ist in einem vereinfachten Blockschaltbild dargestellt. Im "Probiersteller" werden modellgetreu aus den Maßgrößen (Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}$, Lenkwinkel δ und Fahrzeuggeschwindigkeit v) sowie aus den Schätzgrößen (Fahrzeuggeschwindigkeit \hat{v} und Schräglauwinkel $\hat{\alpha}$) die Schräglauwinkel α , der Schwimmwinkel β und die Fahrzeugquergeschwindigkeit v_y sowie die Resultante in Seiten- und Normaleichtung F_y und F_n und die resultierenden Radkräfte F_R ermittelt.

Die Sollwerte für den Schwimmwinkel β_R und die Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}_R$ werden bestimmt aus dem Fahrerangegebenen Lenkwinkel δ , Vorgabemoment M_{VR} (Gaspedalstellung) und Bremsdruck p_{BR} der geschätzten Fahrzeuggeschwindigkeit \hat{v} und der Hubweggröße Δy , die mit Hilfe der Geschätzten Länge- und der gemessenen Querschleunigung ermittelt wird. Dabei werden auch das Übertragungsverhalten des Fahrzeugs sowie Sonderzustufen, wie geneigte Fahrbahn oder unterschiedliche Haftreibungszahlen an den Fahrzeugen (μ -Spalt), berücksichtigt.

Der Fahrmanipulator ist als Zustandsregler ausgelegt. Die geregelten Zustandsgrößen sind der Schwimmwinkel und die Giergeschwindigkeit. Der Regler berücksichtigt den Schwimmwinkel mit steigenden Werten zunehmend. Die Ausgangsgröße des Zustandsreglers entspricht einem Giermoment M_{GR} .

Dieses Giermoment wird nun ebenfalls mit Hilfe der invariablen Zweigpunkt-Fahrzeugmodelle und den aktuellen Schupfwerten λ und den resultierenden Radkräften F_R und den Schräglauwinkeln α in Schräglauwinkeländerungen an gegebenen Rädern umgesetzt. Wenn

das Fahrzeug zum Beispiel beim freien Rollen in einer Rechtskurve übersteuert und die Giergeschwindigkeit übersteuert wird, dann wird unter anderem am linken Vorderrad ein Solibremenschluß vorgegeben. Dadurch wirkt eine nach links drehende Giermomentänderung auf das Fahrzeug, welche die zu große Giergeschwindigkeit abbaut. Der Solibremenschluß durch die untersteigten ABS- bzw. ASR-Regler verändert. Im ungünstigsten Fall oder wenn der Druck den Fahrer vorgegebene "Footlock" nicht ausreicht, um den gewünschten Solibremeschluß einzustellen (Reibtransparenz), wird der Druck in den Bremszylinder aktiv erhöht.

Im ASR-Betrieb übergibt der Fahrmanipulator neben einem anderen abschaltbaren Antilockschlußwert λ_{ASR} und einem Antilockschluß-Toleranzband $\Delta\lambda$ auch einen Bremsersollmoment M_{BR} sowie zur Einstellung des erforderlichen Fahrzeugesolbrennens M_{BR} . Umrechnen für die ABS- und ASR-Grundfunktionen spürbare Verbesserungen bei der aktuatorbezogenen Auswertung des Kraftschlußpotentials zu erreichen, werden alle vorliegenden Maß- und Schätzgrößen auch in den unterlegten Reglern konsequent genutzt.

Unterlegte Brems- und Lenkregler (ABS) und Motorschlupfmomentenregler (ASR)

Für die Regelung des Radchlupfes auf einem vorgegebenen Solibremeschluß der Schlußkraft hinsichtlich genau bestimmt sein. Die Längsgeschwindigkeit des Fahrzeugs wird nicht gemessen, sondern aus den Radgeschwindigkeiten v_{Ri} bestimmt. Dazu werden während einer ABS-Regelung einzelne Räder "unterbremsen", d.h. die Schlußkraft wird unterbremsen, d.h. die Schlußkraft wird konstant gehalten. Unter der Annahme, daß das Rad gegen Ende dieser Zeit abge-

$$v_{\text{Fahrzeug}} = v_{\text{Rad}} \cdot \frac{C_1 - \frac{\lambda_R}{C_2}}{C_1 - \frac{\lambda_R}{C_2}}$$

Elektronisches Stabilitäts-Programm

Die im Radpropellersystem bestimmten Radgeschwindigkeit v_{Ri} (freierlaufend) wird über die Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}$, den Lenkwinkel δ , die Quergeschwindigkeit v_y und die Fahrzeuggeschwindigkeit v der Schwerpunkt transformiert und daraus die Schwerpunktgeschwindigkeit v_{SC} in der Längsrichtung gebildet. Anschließend wird v_{SC} auf die vier Radmittelpunkte zurücktransformiert, um die Radgeschwindigkeiten (freierlaufend) aller vier Räder zu erhalten. Somit kann auch für die verbleibenden drei geregelten Räder der Istschluß λ berechnet werden:

$$\lambda = 1 - \frac{v_{Ri}}{v_{SCi}}$$

Ausgehend von der stationären Bremskraft F_{BR} wird entsprechend der Schlußkraftverteilung über ein PID-Regelgesetz das Sollmoment am Rad gebildet.

$$M_{BRi} = F_{BR} \cdot R + K_1 \dot{\psi}_{SC} + K_2 \dot{\psi}_{SC} + K_3 \dot{\psi}_{SC} + K_4 \dot{\psi}_{SC} + K_5 \dot{\psi}_{SC} + K_6 \dot{\psi}_{SC} + K_7 \dot{\psi}_{SC} + K_8 \dot{\psi}_{SC} + K_9 \dot{\psi}_{SC} + K_{10} \dot{\psi}_{SC} + K_{11} \dot{\psi}_{SC} + K_{12} \dot{\psi}_{SC} + K_{13} \dot{\psi}_{SC} + K_{14} \dot{\psi}_{SC} + K_{15} \dot{\psi}_{SC} + K_{16} \dot{\psi}_{SC} + K_{17} \dot{\psi}_{SC} + K_{18} \dot{\psi}_{SC} + K_{19} \dot{\psi}_{SC} + K_{20} \dot{\psi}_{SC} + K_{21} \dot{\psi}_{SC} + K_{22} \dot{\psi}_{SC} + K_{23} \dot{\psi}_{SC} + K_{24} \dot{\psi}_{SC} + K_{25} \dot{\psi}_{SC} + K_{26} \dot{\psi}_{SC} + K_{27} \dot{\psi}_{SC} + K_{28} \dot{\psi}_{SC} + K_{29} \dot{\psi}_{SC} + K_{30} \dot{\psi}_{SC} + K_{31} \dot{\psi}_{SC} + K_{32} \dot{\psi}_{SC} + K_{33} \dot{\psi}_{SC} + K_{34} \dot{\psi}_{SC} + K_{35} \dot{\psi}_{SC} + K_{36} \dot{\psi}_{SC} + K_{37} \dot{\psi}_{SC} + K_{38} \dot{\psi}_{SC} + K_{39} \dot{\psi}_{SC} + K_{40} \dot{\psi}_{SC} + K_{41} \dot{\psi}_{SC} + K_{42} \dot{\psi}_{SC} + K_{43} \dot{\psi}_{SC} + K_{44} \dot{\psi}_{SC} + K_{45} \dot{\psi}_{SC} + K_{46} \dot{\psi}_{SC} + K_{47} \dot{\psi}_{SC} + K_{48} \dot{\psi}_{SC} + K_{49} \dot{\psi}_{SC} + K_{50} \dot{\psi}_{SC} + K_{51} \dot{\psi}_{SC} + K_{52} \dot{\psi}_{SC} + K_{53} \dot{\psi}_{SC} + K_{54} \dot{\psi}_{SC} + K_{55} \dot{\psi}_{SC} + K_{56} \dot{\psi}_{SC} + K_{57} \dot{\psi}_{SC} + K_{58} \dot{\psi}_{SC} + K_{59} \dot{\psi}_{SC} + K_{60} \dot{\psi}_{SC} + K_{61} \dot{\psi}_{SC} + K_{62} \dot{\psi}_{SC} + K_{63} \dot{\psi}_{SC} + K_{64} \dot{\psi}_{SC} + K_{65} \dot{\psi}_{SC} + K_{66} \dot{\psi}_{SC} + K_{67} \dot{\psi}_{SC} + K_{68} \dot{\psi}_{SC} + K_{69} \dot{\psi}_{SC} + K_{70} \dot{\psi}_{SC} + K_{71} \dot{\psi}_{SC} + K_{72} \dot{\psi}_{SC} + K_{73} \dot{\psi}_{SC} + K_{74} \dot{\psi}_{SC} + K_{75} \dot{\psi}_{SC} + K_{76} \dot{\psi}_{SC} + K_{77} \dot{\psi}_{SC} + K_{78} \dot{\psi}_{SC} + K_{79} \dot{\psi}_{SC} + K_{80} \dot{\psi}_{SC} + K_{81} \dot{\psi}_{SC} + K_{82} \dot{\psi}_{SC} + K_{83} \dot{\psi}_{SC} + K_{84} \dot{\psi}_{SC} + K_{85} \dot{\psi}_{SC} + K_{86} \dot{\psi}_{SC} + K_{87} \dot{\psi}_{SC} + K_{88} \dot{\psi}_{SC} + K_{89} \dot{\psi}_{SC} + K_{90} \dot{\psi}_{SC} + K_{91} \dot{\psi}_{SC} + K_{92} \dot{\psi}_{SC} + K_{93} \dot{\psi}_{SC} + K_{94} \dot{\psi}_{SC} + K_{95} \dot{\psi}_{SC} + K_{96} \dot{\psi}_{SC} + K_{97} \dot{\psi}_{SC} + K_{98} \dot{\psi}_{SC} + K_{99} \dot{\psi}_{SC} + K_{100} \dot{\psi}_{SC} + K_{101} \dot{\psi}_{SC} + K_{102} \dot{\psi}_{SC} + K_{103} \dot{\psi}_{SC} + K_{104} \dot{\psi}_{SC} + K_{105} \dot{\psi}_{SC} + K_{106} \dot{\psi}_{SC} + K_{107} \dot{\psi}_{SC} + K_{108} \dot{\psi}_{SC} + K_{109} \dot{\psi}_{SC} + K_{110} \dot{\psi}_{SC} + K_{111} \dot{\psi}_{SC} + K_{112} \dot{\psi}_{SC} + K_{113} \dot{\psi}_{SC} + K_{114} \dot{\psi}_{SC} + K_{115} \dot{\psi}_{SC} + K_{116} \dot{\psi}_{SC} + K_{117} \dot{\psi}_{SC} + K_{118} \dot{\psi}_{SC} + K_{119} \dot{\psi}_{SC} + K_{120} \dot{\psi}_{SC} + K_{121} \dot{\psi}_{SC} + K_{122} \dot{\psi}_{SC} + K_{123} \dot{\psi}_{SC} + K_{124} \dot{\psi}_{SC} + K_{125} \dot{\psi}_{SC} + K_{126} \dot{\psi}_{SC} + K_{127} \dot{\psi}_{SC} + K_{128} \dot{\psi}_{SC} + K_{129} \dot{\psi}_{SC} + K_{130} \dot{\psi}_{SC} + K_{131} \dot{\psi}_{SC} + K_{132} \dot{\psi}_{SC} + K_{133} \dot{\psi}_{SC} + K_{134} \dot{\psi}_{SC} + K_{135} \dot{\psi}_{SC} + K_{136} \dot{\psi}_{SC} + K_{137} \dot{\psi}_{SC} + K_{138} \dot{\psi}_{SC} + K_{139} \dot{\psi}_{SC} + K_{140} \dot{\psi}_{SC} + K_{141} \dot{\psi}_{SC} + K_{142} \dot{\psi}_{SC} + K_{143} \dot{\psi}_{SC} + K_{144} \dot{\psi}_{SC} + K_{145} \dot{\psi}_{SC} + K_{146} \dot{\psi}_{SC} + K_{147} \dot{\psi}_{SC} + K_{148} \dot{\psi}_{SC} + K_{149} \dot{\psi}_{SC} + K_{150} \dot{\psi}_{SC} + K_{151} \dot{\psi}_{SC} + K_{152} \dot{\psi}_{SC} + K_{153} \dot{\psi}_{SC} + K_{154} \dot{\psi}_{SC} + K_{155} \dot{\psi}_{SC} + K_{156} \dot{\psi}_{SC} + K_{157} \dot{\psi}_{SC} + K_{158} \dot{\psi}_{SC} + K_{159} \dot{\psi}_{SC} + K_{160} \dot{\psi}_{SC} + K_{161} \dot{\psi}_{SC} + K_{162} \dot{\psi}_{SC} + K_{163} \dot{\psi}_{SC} + K_{164} \dot{\psi}_{SC} + K_{165} \dot{\psi}_{SC} + K_{166} \dot{\psi}_{SC} + K_{167} \dot{\psi}_{SC} + K_{168} \dot{\psi}_{SC} + K_{169} \dot{\psi}_{SC} + K_{170} \dot{\psi}_{SC} + K_{171} \dot{\psi}_{SC} + K_{172} \dot{\psi}_{SC} + K_{173} \dot{\psi}_{SC} + K_{174} \dot{\psi}_{SC} + K_{175} \dot{\psi}_{SC} + K_{176} \dot{\psi}_{SC} + K_{177} \dot{\psi}_{SC} + K_{178} \dot{\psi}_{SC} + K_{179} \dot{\psi}_{SC} + K_{180} \dot{\psi}_{SC} + K_{181} \dot{\psi}_{SC} + K_{182} \dot{\psi}_{SC} + K_{183} \dot{\psi}_{SC} + K_{184} \dot{\psi}_{SC} + K_{185} \dot{\psi}_{SC} + K_{186} \dot{\psi}_{SC} + K_{187} \dot{\psi}_{SC} + K_{188} \dot{\psi}_{SC} + K_{189} \dot{\psi}_{SC} + K_{190} \dot{\psi}_{SC} + K_{191} \dot{\psi}_{SC} + K_{192} \dot{\psi}_{SC} + K_{193} \dot{\psi}_{SC} + K_{194} \dot{\psi}_{SC} + K_{195} \dot{\psi}_{SC} + K_{196} \dot{\psi}_{SC} + K_{197} \dot{\psi}_{SC} + K_{198} \dot{\psi}_{SC} + K_{199} \dot{\psi}_{SC} + K_{200} \dot{\psi}_{SC} + K_{201} \dot{\psi}_{SC} + K_{202} \dot{\psi}_{SC} + K_{203} \dot{\psi}_{SC} + K_{204} \dot{\psi}_{SC} + K_{205} \dot{\psi}_{SC} + K_{206} \dot{\psi}_{SC} + K_{207} \dot{\psi}_{SC} + K_{208} \dot{\psi}_{SC} + K_{209} \dot{\psi}_{SC} + K_{210} \dot{\psi}_{SC} + K_{211} \dot{\psi}_{SC} + K_{212} \dot{\psi}_{SC} + K_{213} \dot{\psi}_{SC} + K_{214} \dot{\psi}_{SC} + K_{215} \dot{\psi}_{SC} + K_{216} \dot{\psi}_{SC} + K_{217} \dot{\psi}_{SC} + K_{218} \dot{\psi}_{SC} + K_{219} \dot{\psi}_{SC} + K_{220} \dot{\psi}_{SC} + K_{221} \dot{\psi}_{SC} + K_{222} \dot{\psi}_{SC} + K_{223} \dot{\psi}_{SC} + K_{224} \dot{\psi}_{SC} + K_{225} \dot{\psi}_{SC} + K_{226} \dot{\psi}_{SC} + K_{227} \dot{\psi}_{SC} + K_{228} \dot{\psi}_{SC} + K_{229} \dot{\psi}_{SC} + K_{230} \dot{\psi}_{SC} + K_{231} \dot{\psi}_{SC} + K_{232} \dot{\psi}_{SC} + K_{233} \dot{\psi}_{SC} + K_{234} \dot{\psi}_{SC} + K_{235} \dot{\psi}_{SC} + K_{236} \dot{\psi}_{SC} + K_{237} \dot{\psi}_{SC} + K_{238} \dot{\psi}_{SC} + K_{239} \dot{\psi}_{SC} + K_{240} \dot{\psi}_{SC} + K_{241} \dot{\psi}_{SC} + K_{242} \dot{\psi}_{SC} + K_{243} \dot{\psi}_{SC} + K_{244} \dot{\psi}_{SC} + K_{245} \dot{\psi}_{SC} + K_{246} \dot{\psi}_{SC} + K_{247} \dot{\psi}_{SC} + K_{248} \dot{\psi}_{SC} + K_{249} \dot{\psi}_{SC} + K_{250} \dot{\psi}_{SC} + K_{251} \dot{\psi}_{SC} + K_{252} \dot{\psi}_{SC} + K_{253} \dot{\psi}_{SC} + K_{254} \dot{\psi}_{SC} + K_{255} \dot{\psi}_{SC} + K_{256} \dot{\psi}_{SC} + K_{257} \dot{\psi}_{SC} + K_{258} \dot{\psi}_{SC} + K_{259} \dot{\psi}_{SC} + K_{260} \dot{\psi}_{SC} + K_{261} \dot{\psi}_{SC} + K_{262} \dot{\psi}_{SC} + K_{263} \dot{\psi}_{SC} + K_{264} \dot{\psi}_{SC} + K_{265} \dot{\psi}_{SC} + K_{266} \dot{\psi}_{SC} + K_{267} \dot{\psi}_{SC} + K_{268} \dot{\psi}_{SC} + K_{269} \dot{\psi}_{SC} + K_{270} \dot{\psi}_{SC} + K_{271} \dot{\psi}_{SC} + K_{272} \dot{\psi}_{SC} + K_{273} \dot{\psi}_{SC} + K_{274} \dot{\psi}_{SC} + K_{275} \dot{\psi}_{SC} + K_{276} \dot{\psi}_{SC} + K_{277} \dot{\psi}_{SC} + K_{278} \dot{\psi}_{SC} + K_{279} \dot{\psi}_{SC} + K_{280} \dot{\psi}_{SC} + K_{281} \dot{\psi}_{SC} + K_{282} \dot{\psi}_{SC} + K_{283} \dot{\psi}_{SC} + K_{284} \dot{\psi}_{SC} + K_{285} \dot{\psi}_{SC} + K_{286} \dot{\psi}_{SC} + K_{287} \dot{\psi}_{SC} + K_{288} \dot{\psi}_{SC} + K_{289} \dot{\psi}_{SC} + K_{290} \dot{\psi}_{SC} + K_{291} \dot{\psi}_{SC} + K_{292} \dot{\psi}_{SC} + K_{293} \dot{\psi}_{SC} + K_{294} \dot{\psi}_{SC} + K_{295} \dot{\psi}_{SC} + K_{296} \dot{\psi}_{SC} + K_{297} \dot{\psi}_{SC} + K_{298} \dot{\psi}_{SC} + K_{299} \dot{\psi}_{SC} + K_{300} \dot{\psi}_{SC} + K_{301} \dot{\psi}_{SC} + K_{302} \dot{\psi}_{SC} + K_{303} \dot{\psi}_{SC} + K_{304} \dot{\psi}_{SC} + K_{305} \dot{\psi}_{SC} + K_{306} \dot{\psi}_{SC} + K_{307} \dot{\psi}_{SC} + K_{308} \dot{\psi}_{SC} + K_{309} \dot{\psi}_{SC} + K_{310} \dot{\psi}_{SC} + K_{311} \dot{\psi}_{SC} + K_{312} \dot{\psi}_{SC} + K_{313} \dot{\psi}_{SC} + K_{314} \dot{\psi}_{SC} + K_{315} \dot{\psi}_{SC} + K_{316} \dot{\psi}_{SC} + K_{317} \dot{\psi}_{SC} + K_{318} \dot{\psi}_{SC} + K_{319} \dot{\psi}_{SC} + K_{320} \dot{\psi}_{SC} + K_{321} \dot{\psi}_{SC} + K_{322} \dot{\psi}_{SC} + K_{323} \dot{\psi}_{SC} + K_{324} \dot{\psi}_{SC} + K_{325} \dot{\psi}_{SC} + K_{326} \dot{\psi}_{SC} + K_{327} \dot{\psi}_{SC} + K_{328} \dot{\psi}_{SC} + K_{329} \dot{\psi}_{SC} + K_{330} \dot{\psi}_{SC} + K_{331} \dot{\psi}_{SC} + K_{332} \dot{\psi}_{SC} + K_{333} \dot{\psi}_{SC} + K_{334} \dot{\psi}_{SC} + K_{335} \dot{\psi}_{SC} + K_{336} \dot{\psi}_{SC} + K_{337} \dot{\psi}_{SC} + K_{338} \dot{\psi}_{SC} + K_{339} \dot{\psi}_{SC} + K_{340} \dot{\psi}_{SC} + K_{341} \dot{\psi}_{SC} + K_{342} \dot{\psi}_{SC} + K_{343} \dot{\psi}_{SC} + K_{344} \dot{\psi}_{SC} + K_{345} \dot{\psi}_{SC} + K_{346} \dot{\psi}_{SC} + K_{347} \dot{\psi}_{SC} + K_{348} \dot{\psi}_{SC} + K_{349} \dot{\psi}_{SC} + K_{350} \dot{\psi}_{SC} + K_{351} \dot{\psi}_{SC} + K_{352} \dot{\psi}_{SC} + K_{353} \dot{\psi}_{SC} + K_{354} \dot{\psi}_{SC} + K_{355} \dot{\psi}_{SC} + K_{356} \dot{\psi}_{SC} + K_{357} \dot{\psi}_{SC} + K_{358} \dot{\psi}_{SC} + K_{359} \dot{\psi}_{SC} + K_{360} \dot{\psi}_{SC} + K_{361} \dot{\psi}_{SC} + K_{362} \dot{\psi}_{SC} + K_{363} \dot{\psi}_{SC} + K_{364} \dot{\psi}_{SC} + K_{365} \dot{\psi}_{SC} + K_{366} \dot{\psi}_{SC} + K_{367} \dot{\psi}_{SC} + K_{368} \dot{\psi}_{SC} + K_{369} \dot{\psi}_{SC} + K_{370} \dot{\psi}_{SC} + K_{371} \dot{\psi}_{SC} + K_{372} \dot{\psi}_{SC} + K_{373} \dot{\psi}_{SC} + K_{374} \dot{\psi}_{SC} + K_{375} \dot{\psi}_{SC} + K_{376} \dot{\psi}_{SC} + K_{377} \dot{\psi}_{SC} + K_{378} \dot{\psi}_{SC} + K_{379} \dot{\psi}_{SC} + K_{380} \dot{\psi}_{SC} + K_{381} \dot{\psi}_{SC} + K_{382} \dot{\psi}_{SC} + K_{383} \dot{\psi}_{SC} + K_{384} \dot{\psi}_{SC} + K_{385} \dot{\psi}_{SC} + K_{386} \dot{\psi}_{SC} + K_{387} \dot{\psi}_{SC} + K_{388} \dot{\psi}_{SC} + K_{389} \dot{\psi}_{SC} + K_{390} \dot{\psi}_{SC} + K_{391} \dot{\psi}_{SC} + K_{392} \dot{\psi}_{SC} + K_{393} \dot{\psi}_{SC} + K_{394} \dot{\psi}_{SC} + K_{395} \dot{\psi}_{SC} + K_{396} \dot{\psi}_{SC} + K_{397} \dot{\psi}_{SC} + K_{398} \dot{\psi}_{SC} + K_{399} \dot{\psi}_{SC} + K_{400} \dot{\psi}_{SC} + K_{401} \dot{\psi}_{SC} + K_{402} \dot{\psi}_{SC} + K_{403} \dot{\psi}_{SC} + K_{404} \dot{\psi}_{SC} + K_{405} \dot{\psi}_{SC} + K_{406} \dot{\psi}_{SC} + K_{407} \dot{\psi}_{SC} + K_{408} \dot{\psi}_{SC} + K_{409} \dot{\psi}_{SC} + K_{410} \dot{\psi}_{SC} + K_{411} \dot{\psi}_{SC} + K_{412} \dot{\psi}_{SC} + K_{413} \dot{\psi}_{SC} + K_{414} \dot{\psi}_{SC} + K_{415} \dot{\psi}_{SC} + K_{416} \dot{\psi}_{SC} + K_{417} \dot{\psi}_{SC} + K_{418} \dot{\psi}_{SC} + K_{419} \dot{\psi}_{SC} + K_{420} \dot{\psi}_{SC} + K_{421} \dot{\psi}_{SC} + K_{422} \dot{\psi}_{SC} + K_{423} \dot{\psi}_{SC} + K_{424} \dot{\psi}_{SC} + K_{425} \dot{\psi}_{SC} + K_{426} \dot{\psi}_{SC} + K_{427} \dot{\psi}_{SC} + K_{428} \dot{\psi}_{SC} + K_{429} \dot{\psi}_{SC} + K_{430} \dot{\psi}_{SC} + K_{431} \dot{\psi}_{SC} + K_{432} \dot{\psi}_{SC} + K_{433} \dot{\psi}_{SC} + K_{434} \dot{\psi}_{SC} + K_{435} \dot{\psi}_{SC} + K_{436} \dot{\psi}_{SC} + K_{437} \dot{\psi}_{SC} + K_{438} \dot{\psi}_{SC} + K_{439} \dot{\psi}_{SC} + K_{440} \dot{\psi}_{SC} + K_{441} \dot{\psi}_{SC} + K_{442} \dot{\psi}_{SC} + K_{443} \dot{\psi}_{SC} + K_{444} \dot{\psi}_{SC} + K_{445} \dot{\psi}_{SC} + K_{446} \dot{\psi}_{SC} + K_{447} \dot{\psi}_{SC} + K_{448} \dot{\psi}_{SC} + K_{449} \dot{\psi}_{SC} + K_{450} \dot{\psi}_{SC} + K_{451} \dot{\psi}_{SC} + K_{452} \dot{\psi}_{SC} + K_{453} \dot{\psi}_{SC} + K_{454} \dot{\psi}_{SC} + K_{455} \dot{\psi}_{SC} + K_{456} \dot{\psi}_{SC} + K_{457} \dot{\psi}_{SC} + K_{458} \dot{\psi}_{SC} + K_{459} \dot{\psi}_{SC} + K_{460} \dot{\psi}_{SC} + K_{461} \dot{\psi}_{SC} + K_{462} \dot{\psi}_{SC} + K_{463} \dot{\psi}_{SC} + K_{464} \dot{\psi}_{SC} + K_{465} \dot{\psi}_{SC} + K_{466} \dot{\psi}_{SC} + K_{467} \dot{\psi}_{SC} + K_{468} \dot{\psi}_{SC} + K_{469} \dot{\psi}_{SC} + K_{470} \dot{\psi}_{SC} + K_{471} \dot{\psi}_{SC} + K_{472} \dot{\psi}_{SC} + K_{473} \dot{\psi}_{SC} + K_{474} \dot{\psi}_{SC} + K_{475} \dot{\psi}_{SC} + K_{476} \dot{\psi}_{SC} + K_{477} \dot{\psi}_{SC} + K_{478} \dot{\psi}_{SC} + K_{479} \dot{\psi}_{SC} + K_{480} \dot{\psi}_{SC} + K_{481} \dot{\psi}_{SC} + K_{482} \dot{\psi}_{SC} + K_{483} \dot{\psi}_{SC} + K_{484} \dot{\psi}_{SC} + K_{485} \dot{\psi}_{SC} + K_{486} \dot{\psi}_{SC} + K_{487} \dot{\psi}_{SC} + K_{488} \dot{\psi}_{SC} + K_{489} \dot{\psi}_{SC} + K_{490} \dot{\psi}_{SC} + K_{491} \dot{\psi}_{SC} + K_{492} \dot{\psi}_{SC} + K_{493} \dot{\psi}_{SC} + K_{494} \dot{\psi}_{SC} + K_{495} \dot{\psi}_{SC} + K_{496} \dot{\psi}_{SC} + K_{497} \dot{\psi}_{SC} + K_{498} \dot{\psi}_{SC} + K_{499} \dot{\psi}_{SC} + K_{500} \dot{\psi}_{SC} + K_{501} \dot{\psi}_{SC} + K_{502} \dot{\psi}_{SC} + K_{503} \dot{\psi}_{SC} + K_{504} \dot{\psi}_{SC} + K_{505} \dot{\psi}_{SC} + K_{506} \dot{\psi}_{SC} + K_{507} \dot{\psi}_{SC} + K_{508} \dot{\psi}_{SC} + K_{509} \dot{\psi}_{SC} + K_{510} \dot{\psi}_{SC} + K_{511} \dot{\psi}_{SC} + K_{512} \dot{\psi}_{SC} + K_{513} \dot{\psi}_{SC} + K_{514} \dot{\psi}_{SC} + K_{515} \dot{\psi}_{SC} + K_{516} \dot{\psi}_{SC} + K_{517} \dot{\psi}_{SC} + K_{518} \dot{\psi}_{SC} + K_{519} \dot{\psi}_{SC} + K_{520} \dot{\psi}_{SC} + K_{521} \dot{\psi}_{SC} + K_{522} \dot{\psi}_{SC} + K_{523} \dot{\psi}_{SC} + K_{524} \dot{\psi}_{SC} + K_{525} \dot{\psi}_{SC} + K_{526} \dot{\psi}_{SC} + K_{527} \dot{\psi}_{SC} + K_{528} \dot{\psi}_{SC} + K_{529} \dot{\psi}_{SC} + K_{530} \dot{\psi}_{SC} + K_{531} \dot{\psi}_{SC} + K_{532} \dot{\psi}_{SC} + K_{533} \dot{\psi}_{SC} + K_{534} \dot{\psi}_{SC} + K_{535} \dot{\psi}_{SC} + K_{536} \dot{\psi}_{SC} + K_{537} \dot{\psi}_{SC} + K_{538} \dot{\psi}_{SC} + K_{539} \dot{\psi}_{SC} + K_{540} \dot{\psi}_{SC} + K_{541} \dot{\psi}_{SC} + K_{542} \dot{\psi}_{SC} + K_{543} \dot{\psi}_{SC} + K_{544} \dot{\psi}_{SC} + K_{545} \dot{\psi}_{SC} + K_{546} \dot{\psi}_{SC} + K_{547} \dot{\psi}_{SC} + K_{548} \dot{\psi}_{SC} + K_{549} \dot{\psi}_{SC} + K_{550} \dot{\psi}_{SC} + K_{551} \dot{\psi}_{SC} + K_{552} \dot{\psi}_{SC} + K_{553} \dot{\psi}_{SC} + K_{554} \dot{\psi}_{SC} + K_{555} \dot{\psi}_{SC} + K_{556} \dot{\psi}_{SC} + K_{557} \dot{\psi}_{SC} + K_{558} \dot{\psi}_{SC} + K_{559} \dot{\psi}_{SC} + K_{560} \dot{\psi}_{SC} + K_{561} \dot{\psi}_{SC} + K_{562} \dot{\psi}_{SC} + K_{563} \dot{\psi}_{SC} + K_{564} \dot{\psi}_{SC} + K_{565} \dot{\psi}_{SC} + K_{566} \dot{\psi}_{SC} + K_{567} \dot{\psi}_{SC} + K_{568} \dot{\psi}_{SC} + K_{569} \dot{\psi}_{SC} + K_{570} \dot{\psi}_{SC} + K_{571} \dot{\psi}_{SC} + K_{572} \dot{\psi}_{SC} + K_{573} \dot{\psi}_{SC} + K_{574} \dot{\psi}_{SC} + K_{575} \dot{\psi}_{SC} + K_{576} \dot{\psi}_{SC} + K_{577} \dot{\psi}_{SC} + K_{578} \dot{\psi}_{SC} + K_{579} \dot{\psi}_{SC} + K_{580} \dot{\psi}_{SC} + K_{581} \dot{\psi}_{SC} + K_{582} \dot{\psi}_{SC} + K_{583} \dot{\psi}_{SC} + K_{584} \dot{\psi}_{SC} + K_{585} \dot{\psi}_{SC} + K_{586} \dot{\psi}_{SC} + K_{587} \dot{\psi}_{SC} + K_{588} \dot{\psi}_{SC} + K_{589} \dot{\psi}_{SC} + K_{590} \dot{\psi}_{SC} + K_{591} \dot{\psi}_{SC} + K_{592} \dot{\psi}_{SC} + K_{593} \dot{\psi}_{SC} + K_{594} \dot{\psi}_{SC} + K_{595} \dot{\psi}_{SC} + K_{596} \dot{\psi}_{SC} + K_{597} \dot{\psi}_{SC} + K_{598} \dot{\psi}_{SC} + K_{599} \dot{\psi}_{SC} + K_{600} \dot{\psi}_{SC} + K_{601} \dot{\psi}_{SC} + K_{602} \dot{\psi}_{SC} + K_{603} \dot{\psi}_{SC} + K_{604} \dot{\psi}_{SC} + K_{605} \dot{\psi}_{SC} + K_{606} \dot{\psi}_{SC} + K_{607} \dot{\psi}_{SC} + K_{608} \dot{\psi}_{SC} + K_{609} \dot{\psi}_{SC} + K_{610} \dot{\psi}_{SC} + K_{611} \dot{\psi}_{SC} + K_{612} \dot{\psi}_{SC} + K_{613} \dot{\psi}_{SC} + K_{614} \dot{\psi}_{SC} + K_{615} \dot{\psi}_{SC} + K_{616} \dot{\psi}_{SC} + K_{617} \dot{\psi}_{SC} + K_{618} \dot{\psi}_{SC} + K_{619} \dot{\psi}_{SC} + K_{620} \dot{\psi}_{SC} + K_{621} \dot{\psi}_{SC} + K_{622} \dot{\psi}_{SC} + K_{623} \dot{\psi}_{SC} + K_{624} \dot{\psi}_{SC} + K_{625} \dot{\psi}_{SC} + K_{626} \dot{\psi}_{SC} + K_{627} \dot{\psi}_{SC} + K_{628} \dot{\psi}_{SC} + K_{629} \dot{\psi}_{SC} + K_{630} \dot{\psi}_{SC} + K_{631} \dot{\psi}_{SC} + K_{632} \dot{\psi}_{SC} + K_{633} \dot{\psi}_{SC} + K_{634} \dot{\psi}_{SC} + K_{635} \dot{\psi}_{SC} + K_{636} \dot{\psi}_{SC} + K_{637} \dot{\psi}_{SC} + K_{638} \dot{\psi}_{SC} + K_{639} \dot{\psi}_{SC} + K_{640} \dot{\psi}_{SC} + K_{641} \dot{\psi}_{SC} + K_{642} \dot{\psi}_{SC} + K_{643} \dot{\psi}_{SC} + K_{644} \dot{\psi}_{SC} + K_{645} \dot{\psi}_{SC} + K_{646} \dot{\psi}_{SC} + K_{647} \dot{\psi}_{SC} + K_{648} \dot{\psi}_{SC} + K_{649} \dot{\psi}_{SC} + K_{650} \dot{\psi}_{SC} + K_{651} \dot{\psi}_{SC} + K_{652} \dot{\psi}_{SC} + K_{653} \dot{\psi}_{SC} + K_{654} \dot{\psi}_{SC} + K_{655} \dot{\psi}_{SC} + K_{656} \dot{\psi}_{SC} + K_{657} \dot{\psi}_{SC} + K_{658} \dot{\psi}_{SC} + K_{659} \dot{\psi}_{SC} + K_{660} \dot{\psi}_{SC} + K_{661} \dot{\psi}_{SC} + K_{662} \dot{\psi}_{SC} + K_{663} \dot{\psi}_{SC} + K_{664} \dot{\psi}_{SC} + K_{665} \dot{\psi}_{SC} + K_{666} \dot{\psi}_{SC} + K_{667} \dot{\psi}_{SC} + K_{668} \dot{\psi}_{SC} + K_{669} \dot{\psi}_{SC} + K_{670} \dot{\psi}_{SC} + K_{671} \dot{\psi}_{SC} + K_{672} \dot{\psi}_{SC} + K_{673} \dot{\psi}_{SC} + K_{674} \dot{\psi}_{SC} + K_{675} \dot{\psi}_{SC} + K_{676} \dot{\psi}_{SC} + K_{677} \dot{\psi}_{SC} + K_{678} \dot{\psi}_{SC} + K_{679} \dot{\psi}_{SC} + K_{680} \dot{\psi}_{SC} + K_{681} \dot{\psi}_{SC} + K_{682} \dot{\psi}_{SC} + K_{683} \dot{\psi}_{SC} + K_{684} \dot{\psi}_{SC} + K_{685} \dot{\psi}_{SC} + K_{686} \dot{\psi}_{SC} + K_{687} \dot{\psi}_{SC} + K_{688} \dot{\psi}_{SC} + K_{689} \dot{\psi}_{SC} + K_{690} \dot{\psi}_{SC} + K_{691} \dot{\psi}_{SC} + K_{692} \dot{\psi}_{SC} + K_{693} \dot{\psi}_{SC} + K_{694} \dot{\psi}_{SC} + K_{695} \dot{\psi}_{SC} + K_{696} \dot{\psi}_{SC} + K_{697} \dot{\psi}_{SC} + K_{698} \dot{\psi}_{SC} + K_{699} \dot{\psi}_{SC} + K_{700} \dot{\psi}_{SC} + K_{701} \dot{\psi}_{SC} + K_{702} \dot{\psi}_{SC} + K_{703} \dot{\psi}_{SC} + K_{704} \dot{\psi}_{SC} + K_{705} \dot{\psi}_{SC} + K_{706} \dot{\psi}_{SC} + K_{707} \dot{\psi}_{SC} + K_{708} \dot{\psi}_{SC} + K_{709} \dot{\psi}_{SC} + K_{710} \dot{\psi}_{SC} + K_{711} \dot{\psi}_{SC} + K_{712} \dot{\psi}_{SC} + K_{713} \dot{\psi}_{SC} + K_{714} \dot{\psi}_{SC} + K_{715} \dot{\psi}_{SC} + K_{716} \dot{\psi}_{SC} + K_{717} \dot{\psi}_{SC} + K_{718} \dot{\psi}_{SC} + K_{719} \dot{\psi}_{SC} + K_{720} \dot{\psi}_{SC} + K_{721} \dot{\psi}_{SC} + K_{722} \dot{\psi}_{SC} + K_{723} \dot{\psi}_{SC} + K_{724} \dot{\psi}_{SC} + K_{725} \dot{\psi}_{SC} + K_{726} \dot{\psi}_{SC} + K_{727} \dot{\psi}_{SC} + K_{728} \dot{\psi}_{SC} + K_{729} \dot{\psi}_{SC} + K_{730} \dot{\psi}_{SC} + K_{731} \dot{\psi}_{SC} + K_{732} \dot{\psi}_{SC} + K_{733} \dot{\psi}_{SC} + K_{734} \dot{\psi}_{SC} + K_{735} \dot{\psi}_{SC} + K_{736} \dot{\psi}_{SC} + K_{737} \dot{\psi}_{SC} + K_{738} \dot{\psi}_{SC} + K_{739} \dot{\psi}_{SC} + K_{740} \dot{\psi}_{SC} + K_{741} \dot{\psi}_{SC} + K_{742} \dot{\psi}_{SC} + K_{743} \dot{\psi}_{SC} + K_{744} \dot{\psi}_{SC} + K_{745} \dot{\psi}_{SC} + K_{746} \dot{\psi}_{SC} + K_{747} \dot{\psi}_{SC} + K_{748} \dot{\psi}_{SC} + K_{749} \dot{\psi}_{SC} + K_{750} \dot{\psi}_{SC} + K_{751} \dot{\psi}_{SC} + K_{752}$$

Bremsmoment M_{Brem} muß das eventuell verbleibende Bremsmoment über den Bremsdruck hergestellt werden.

$$P_{\text{Brem}} = \frac{M_{\text{Brem}} + M_{\text{Hilfs}}}{C_p}$$

Der vom Regler gebildete Druck in den Radzylindern P_{Rad} wird über die Ventile hydraulik und den zugehörigen Ventileinstellmodus U_{Vent} angesteuert. Mit einem inversen Hydraulikmodell, dessen Parameter λ_0 vorab bestimmt und im Regler abgelegt werden, wird die gesuchte Ventileinstellung berechnet. Im wesentlichen besteht das Modell aus dem Bernoulli-Ansatz für inkompressible Medien und einer Druck-Volumen-Charakteristik.

$$U_{\text{Vent}} = \frac{P_{\text{Rad}} - P_{\text{atm}}}{(1 + \lambda_0 \cdot P_{\text{Rad}}) \cdot (U_{\text{Vent}} - P_{\text{atm}})}$$

$U_{\text{Vent}} > 0$ Druck aufbauen,
 $U_{\text{Vent}} = 0$ Druck halten,
 $U_{\text{Vent}} < 0$ Druck abbauen.

Da der Ventileinstellmodus U_{Vent} betrachtet und quantifiziert wird, muß über das Hydraulikmodell der tatsächlich eingestiegene Druck P_{Rad} berechnet werden. Über das Momentengleichgewicht am Rad können dann bei bekanntem Radbremsdruck und den gemessenen Radgeschwindigkeiten die aktuelle Relativbremskraft F_0 und das statische Bremsmoment F_{B} bestimmt werden:

$$F_0 = C_p \cdot \frac{P_{\text{Rad}}}{R} - \frac{M_{\text{Gelenk}}}{R} + \frac{F_{\text{Gd}}}{R} \cdot \frac{d}{dt} \cdot U_{\text{Rad}}$$

$$F_{\text{B}} = I_0 \cdot \frac{d}{dt} F_0 + F_0$$

Die statische (geometrische) Bremskraft F_{B} dient nun als Bezugsgröße des PID-Reglers. Aus dem errechneten Arbeitspunkt λ_0 und der vom Fahrdynamikregler vorgegebenen Schlupfänderung errechnet der ABS-Regler den einzustellenden Relativschlupf λ_{rel} :

$$\lambda_0 = A_0 \cdot f_{\text{Hilfs}} + \frac{A_1}{U_{\text{Hilfs}}} + A_2$$

$$P_{\text{Hilfs}} = \frac{F_0 + F_{\text{B}}}{F_{\text{B}}}$$

Antriebschlupfregler (ASR)

Der Antriebschlupfregler wird nur zur Schlupfregelung bei Motorantrieb eingesetzt. Aktivgriffe an den Vorder- und Hinterrädern werden von dem Bremschlupfregler direkt bestimmt. Abweichend von ABS erhält der Antriebschlupfregler als Führungsgrößen vom Fahrdynamikregler den mittleren Antriebschlupf λ_{ASR} und die beiden Antriebsräder und ein Bremsmoment M_{Brem} zur direkten Beeinflussung des Drehmoments. Der Sollwert für die Differenzgeschwindigkeit der beiden Antriebsräder Δv_{ASR} ist die Differenz ihrer Radgeschwindigkeiten (Innen- und Außenrad), wobei der Fahrdynamikregler zusätzlich noch ein Toleranzband Δv_{tol} für die Differenz der beiden Antriebsräder vorgibt, die eine tote Zone für die Regelabweichung darstellt, damit ein Bremsmoment M_{Brem} nur bei Bedarf wirkt.

Das ASR-Modul berechnet das Bremsmoment M_{Brem} über die beiden Antriebsräder, das Motormoment M_{Motor} für den Drosselschlepptritt, den Sollwert M_{Motor} für die Motormomentreduzierung durch die Zündwinkelverstellung (ZHV) sowie optional die Anzahl der Zylinder und die Zeitdauer T_{ZHV} für welche die Kraftstoffinjektion ausgesetzt werden soll.

Die Sollwerte für die Radwellen- und Differenzgeschwindigkeit (U_{ASR} und Δv_{ASR}) werden aus den Schlupfgrößen mit den Radgeschwindigkeiten (Innen- und Außenrad) gebildet. Die Reglergrößen U_{ASR} und Δv_{ASR} werden bei Heckantrieb aus den Radgeschwindigkeiten U_{Hilfs} und U_{Hilfs} ermittelt:

$$U_{\text{ASR}} = \frac{1}{2} (U_{\text{Hilfs}} + U_{\text{Hilfs}})$$

$$\Delta v_{\text{ASR}} = U_{\text{Hilfs}} - U_{\text{Hilfs}}$$

Die Dynamik hängt von den sehr unterschiedlichen Betriebszuständen der Radpolen ab. Deshalb wird der Betriebszustand ermittelt, um die Reglerparameter an die Streckendynamik und die Nichtlinearitäten anpassen zu können. Auf die Radwellengeschwindigkeit U_{ASR} wird das Trägheitsmoment des gesamten Antriebsstrahles (Motor, Getriebe, Kardantrieb und Antriebsräder), die

Kardanwellengeschwindigkeit wird durch eine relativ große Zeitkonstante (langsame Dynamik) beschreiben. Dagegen ist die Zeitkonstante der Radwellengeschwindigkeit wesentlich kleiner, weil die Dynamik von hydraulischen Ventilen durch die Trägheitsmomente der Radwellen bestimmt wird. Außerdem wird der Motor bei U_{ASR} und U_{Hilfs} verwendet, weil eine geeignete Zerlegung des getrennten Zweigkreissystems (gemessene Radgeschwindigkeit U_{Hilfs} und U_{Hilfs}) in zwei Teilsysteme mit unterschiedlicher Dynamik und unterschiedlich starken Motorflüssen zulässig ist.

Die Motorflüsse und der dynamische Anteil des Trägheitsmoments sind die Stellgrößen des Reglers für die Kardanwellengeschwindigkeit U_{ASR} . Der „asymmetrische“ Anteil des Bremsmomentes ist das Stellsignal des Reglers für die Radwellengeschwindigkeit U_{Hilfs} . Die Kardanwellengeschwindigkeit wird durch einen nichtlinearen PID-Regler

Blockschaltbild des Antriebschlupfreglers mit den Ein- und Ausgangsgrößen.

